

Al6061-T6 마찰교반용접시 핀 형상과 이송속도가 기계적 강도에 미치는 영향에 관한 연구

박희상*, 이영호⁺, 최원두⁺⁺, 고준빈⁺⁺⁺
(논문접수일 2007. 12. 5, 심사완료일 2008. 3. 8)

A Study on the Effect that Pin Shape and Welding Speed have an Influence on Mechanical Strength in Friction Stir Welding Al6061-T6

Hee Sang Park*, Young Ho Lee⁺, Won Doo Choi⁺⁺, Jun Bin Ko⁺⁺⁺

Abstract

Friction stir welding(FSW) is an relatively new solid state joining process. Al6061-T6 aluminium alloy has gathered wide acceptance in the fabrication of light weight structures requiring a high strength to weight ratio and good corrosion resistance. This friction stir process(FSP) uses a non-consumable tool to generate frictional heat in the abutting surfaces. The welding parameters such as tool rotational speed, welding speed, etc., and tool pin profile play a major role in deciding FSP zone formation in Al6061-T6 aluminium alloy. Two different tool pin profiles have been used to fabricate the joints. The formation of friction stir processed zone has been analysed macroscopically. Tensile properties of the joints have been evaluated and correlated with the friction stir processed zone formation.

Key Words : Friction stir welding(마찰교반용접), Al(알루미늄), Clockwise(시계방향), Counter clockwise(반시계방향)

1. 서론

최근 산업이 고속화 정밀화되는 추세에서 용접은 광범위한 분야에서 근간을 이루는 분야가 되어 있다. 대부분의 용접방법은 열원을 만들어 그것을 모재에 사용하여 용융하여

재료를 접합하는 방법이 주로 사용되고 있으나 이러한 방법은 높은 열에 의한 열응력의 발생을 억제하기 힘들고 그로 인한 잔류응력과 변형이 기계적 성능을 떨어뜨리며 또한 열전도가 빠른 재료는 용접하기 어려운 단점이 있었다. 이러한 기존의 용접법과는 다른 새로운 용접법으로 마찰교반용접

* 충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단
+ 충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단
++ 충남대학교 기계공학과 대학원
+++ 교신저자, 한밭대학교 기계공학부 (kjb1002@hanbat.ac.kr)
주소: 305-719 대전광역시 유성구 덕명동 산16-1

(Friction stir welding:FSW)이 1991년 영국에서 개발되어 현재 산업현장에 점차 사용되고 있는 추세이다⁽¹⁻⁴⁾. FSW는 기존에 주로 사용 되어오던 마찰용접법인 봉과 관만이 아닌 모재 위를 소모식 혹은 비소모식의 핀을 갖은 툴이 모재 위를 마찰회전하며 연속적으로 접합해가는 일종의 연속적 고상용접법이라 할 수 있다. 최근 고속화 정밀화에 가공이 용이한 철도, 차량등의 구조물에 많이 사용되는 알루미늄 등의 비철금속을 접합하는데 기존의 용융용접보다는 열변형, 열응력 등을 감소시킬 수 있으며 용접 후 외관의 상태가 좋고 가공성과 장시간 가공시의 경제성, 기계적 성능이 우수한 점이 부각되어 현재 항공, 자동차, 철도, 조선 등 많은 분야에 사용되고 있다⁽⁵⁾.

하지만 FSW 기술은 용접에 사용되는 모재의 재질, 용접 조건, 툴의 다양성에 따른 재료의 용접성도 큰 차이를 보이기에 아직은 더 많은 연구가 필요한 분야이기도 하다. 그러므로 마찰교반용접에 가장 큰 영향을 미치는 부분인 용접툴의 연구는 선진기술과 경쟁을 하기 위해서 꼭 필요한 분야이다. 따라서 본 논문은 핀의 형상이 다른 마찰교반용접용 툴들을 이용하여 경량으로 강도가 요구되는 곳에 사용되는 Al 6061-T6 재질을 각각의 다른 툴 회전수와 이송속도를 변화시켜 툴의 특성에 따른 모재의 기계적강도와 조직의 상태를 분석하여 최적의 용접조건을 찾아보았다.

2. 실험 재료 및 실험 방법

2.1 실험재료

본 실험에서는 Al6061-T6 알루미늄 압출재를 길이 150mm 너비 80mm 두께 3mm로 제작하여 실험하였다. 시편을 맞대어 고정할 수 있는 고정장치 Fig. 1에 시편을 물려 설치하

Table 1 Chemical composition of materials(Wt. %)

Materials	Si	Mn	Mg	Cu	Cr	Fe	Al
A6061-T6	0.58	0.12	1.1	0.22	0.20	0.35	Bal.

Table 2 Mechanical properties of material

Mechanical properties			
Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
359	335	10	125

여 맞대기 용접이 가능하도록 수평을 맞춘 후 양단을 일정각도로 고정하여 움직이지 못하게 하였다. 각각의 고정압은 일정할 수 있도록 나사의 회전비율을 맞추었으며 실험재료의 화학성분과 기계적 물성치는 Table 1과 Table 2와 같다.

2.2 실험방법

2.2.1 용접조건

알루미늄 판재를 마찰교반용접의 실험조건을 수행 할 수 있는 조건을 갖춘 수직밀링머신의 베드 위에 알루미늄판재를 고정하여 용접 작업 시 발생하는 열을 효율적으로 배출해 줄 수 있는 백킹플레이트와 클램프장치를 결합한 고정틀에 알루미늄 판재를 맞대어 위치시킨 후 옆면에 있는 간격조절 나사를 이용하여 알루미늄 모재 판과 판사이의 간격을 없는 상태로 만든 후 Fig. 1에서처럼 용접한다.

실험 툴의 회전수는 예비시험을 통하여 가장 양호한 시험값을 보인 2380rpm에서 실험을 진행하였고, 고려할 변수로는 툴의 회전방향, 이송속도, 툴의 압입, 핀의 형상 등을 고려하였으며 툴의 전진각은 2.5°로 고정하였다.

툴의 재질은 공구강으로 나사형(Threaded cylindrical) 핀을 갖은 툴(T tool)과 사각뿔형(Quadrangular pyramid) 핀을 갖은 툴(Q tool)을 사용하였으며 각각의 형상은 Fig. 2와 같다. 또한 툴의 압입조건은 툴을 회전시킨 후 툴 솔더(shoulder)가 판재에 닿았을 때를 압입의 기준으로 하였다.

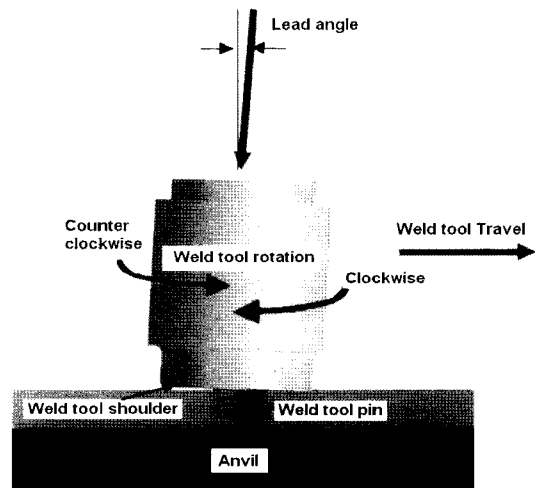
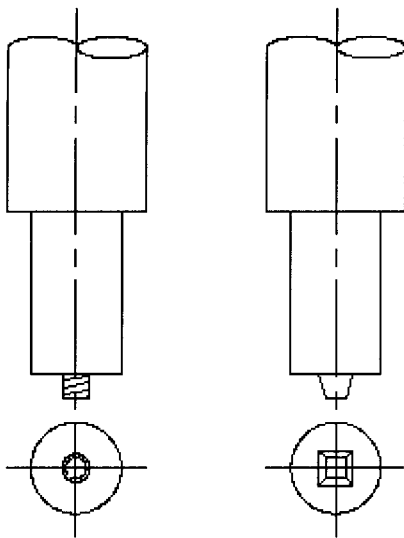


Fig. 1 Typical weld tool and process parameters used in the FSW process



(a) Threaded cylindrical (b) Quadrangular pyramid

Fig. 2 FSW tool pin profiles

2.2.2 용접부의 미세조직 관찰

각각의 다른 조건에서 실험한 시편의 단면을 광학현미경을 이용하여 각각의 용접조직들을 미세 관찰 하였다.

광학현미경 관찰을 위해 일반적인 연마법을 이용하여 시편을 제작하였고, 증류수120ml, 질산3ml, 염산2ml, 불산2ml를 사용한 켈러시약을 사용하여 60sec로 부식하여 각각의 조직영역을 관찰하였다.

2.2.3 기계적 강도 특성 평가

시험에 사용한 마이크로 경도 시험기는 Matsuzawa 사의 MMT-7으로 배율은 400배로 하여 하중은 200kgf, 하중시간은 10sec로하여 경도를 측정하였고, 인장강도를 측정하기 위하여 Fig. 3과 같은 시편을 제작하였고, 시험에 사용된 시험기는 INSTRON 4484를 IX series 프로그램을 이용하여

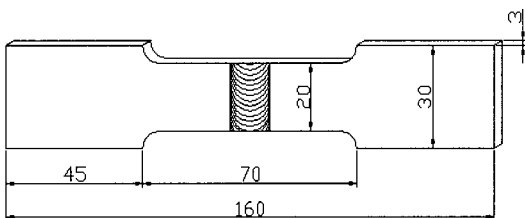


Fig. 3 Dimensions of tensile specimen

컴퓨터 제어하여 인장속도를 2mm/min로 하여 인장시험을 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합부 조직

3.1.1 핀 형상에 따른 접합부 거동

접합부의 조직 형태는 각각의 톨마다의 특징이 다르게 나타났는데 톨의 시계방향(C:clockwise)회전과 반시계(UC: Counter clockwise) 방향의 회전 시 접합부의 조직이 다른 모습으로 접합되는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 나사툴을 반시계방향으로 가공시 나타나는 대표적인 조직을 나타낸 것으로 나사툴과 사각뿔형 톨에서도 거동의 형태가 조금씩 다르지만 전체적인 조직형태는 마찰교반용접의 대표적인 조직형태를 나타내고 있다. 마찰교반용접부는 각각의 조직이 다르게 나타나는데 열 및 기계적인 영향에 의해 교반부 SZ(Stir Zone)와 열 및 기계적인 영향부 TMAZ(Thermo-Mechanically Affected Zone), 열 영향부 HAZ(Heat Affected Zone)와 모재(Base Metal)로 분류된

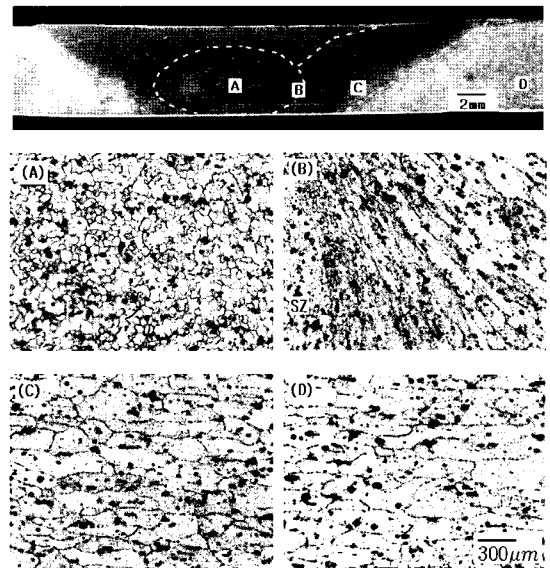


Fig. 4 Cross-sectional macrostructures of the weld zone and elated microstructures indicated in the macrograph : (A) SZ(Stir Zone), (B) TMAZ (Thermo-Mechanically Affected Zone), (C) HAZ (Heat Affected Zone), (D) BM(Base Metal)

다. 교반부 (A)는 모재에 비해 미세한 등축정의 결정립형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 회전하는 툴의 마찰열과 극심한 소성변형에 따른 상호작용으로 재결정 조직이 형성된다. 열 및 기계적인 영향부 (B)의 경우, 일반적으로 툴의 회전에 기인한 연신된 조직 및 미시적으로는 동적회복(dynamic recovery)이 형성된다고 알려져 있으며 입내에는 많은 저경각 입자의 아 결정립 셀(subgrain cell)이 형성된다고 보고되고 있다⁽⁶⁾. (C)는 모재와 유사한 결정립 크기를 가지고 있으며 툴의 접촉이 없이 마찰열의 영향만을 받는 영역이다. 그러나 마찰열에 의한 결정립성장은 뚜렷하게 관찰되지는 않았다.

Fig. 4에 나타냈듯이 FSW부의 중앙부(SZ)에서는 결정립이 미세화될 뿐 만 아니라 Onion ring 또는 Kissing bond 등이 형성되지만 이들의 조성 및 생성기구에 대해서는 보고된바가 없었다. 그러나 최근 강재(鋼材)등⁽⁷⁾은 6N01 Al

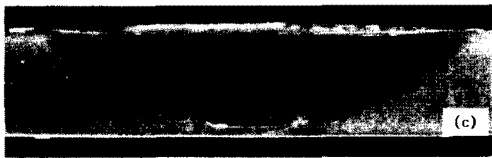
합금 FSW부에서 형성되는 산화물의 형태, 분포, 교반 및 성장기구에 관하여 조하여 접합재 맞대기 표면의 산화막이 접합부내로 혼입되어 접합부내에서 Ring 또는 선상의 형태로 잔존하게 된다고 보고 하였다. 접합재 맞대기 표면에 존재하고 있는 기존의 산화막($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)은 회전툴의 회전작용에 의해 분쇄, 파괴 및 교반이 반복되면서 표면근방은 솔더에 의해 눌러 아래방향으로, 접합부 중앙부근의 산화막은 회전툴의 회전에 의해 상하 양방향으로 성장하며 접합부 이면 근방의 접합재 맞대기 표면에 존재하고 있던 산화막은 핀의 회전작용에 의해 위 방향으로 성장하게 된다⁽⁸⁾. 이러한 교반작용에 의해 분쇄, 파괴 및 교반이 반복된 맞대기 접합표면의 산화막은 핀의 교반작용이 큰 경우($<0.2\text{mm/r}$)는 Ring 상으로, 핀의 교반작용이 비교적 작은 경우($>0.3\text{mm/r}$)는 선상으로 분포하게 된다. 그러나 교반작용이 비교적 큰 경우에 형성되는 Onion ring의 생성기구에 대한 연구는 유한요소해



(a) T tool : 400mm/min clockwise



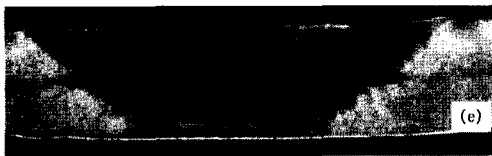
(b) T tool : 400mm/min counter clockwise



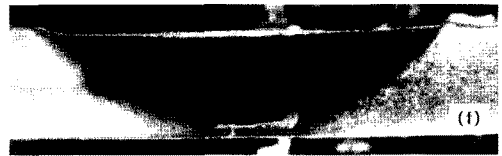
(c) T tool : 600mm/min clockwise



(d) T tool:600mm/min counter clockwise



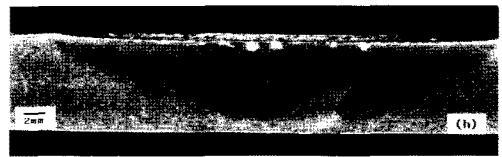
(e) Q tool : 400mm/min clockwise



(f) Q tool : 400mm/min counter clockwise



(g) Q tool : 600mm/min clockwise



(h) Q tool : 600mm/min counter clockwise

Fig. 5 Macro structural variation with various welding conditions

석을 통하여 툴의 진행방향의 위쪽과 후방의 아래쪽으로 섞이는 과정에서 나타난다고 보고 하고 있다⁹⁾. Fig. 5에서 보는 것처럼 오른나사로 핀이 가공된 나사형툴의 경우는 진행 방향에서 시계방향으로 툴이 회전하는 (a),(c)경우에 깔때기 모양의 접합부 상태를 보인 반면 진행방향에서 반시계 방향으로 회전한 (b),(d)경우의 조직상태는 등근 타원형 모양의 조직상태를 보였다.

하지만 사각뿔형툴의 경우는 시계방향(e),(g)과 반시계 방향(f),(h) 모두에서 형태가 유사한 밀이 넓은 깔때기형상의 조직을 보임에 따라 나사형 핀과 사각뿔형 핀 형상의 차이로 인하여 접합부 조직이 달라졌음을 판단할 수 있다. 이는 600mm/min 이송이나 400mm/min의 이송시에도 같은 패턴의 형상을 보였으며 이러한 차이는 나사형 툴의 경우 오른나사의 나사산의 핀 형상에 따라 모재를 파고들어가는 역할을 하여 압입이 쉽게 이루어지며 재료가 나사형 핀을 타고 올라와 솔더(shoulder)에 의해 콘형상의 모양으로 재결정되는 것으로 보이며 반시계방향의 경우 모재가 나사홈을 타고 올라오는 방식이 아닌 모재를 벙킹플레이트 쪽으로 밀어내며 회전을 하게 되므로 나사형 툴의 반시계방향 접합 시 핀의 나사산에 의해 재료가 떨어져 올라가는 현상이 발생하지 않게 된다.

그에 따라 모재내부에서 유동이 감혀있게 되는 현상이 발생하여 조직의 모양이 타원형 형태로 나타남을 알 수 있었다. 이는 핀의 형태에 따라 핀의 압입의 정도도 달라져야 함을 판단 할 수 있는데 나사산의 형태를 갖춘 핀으로 가공할 경우 나사산의 형성 방향에 따라 압입력을 조절하여야 더욱 나은 용접이 가능함을 예비실험을 통하여 찾아 낼 수 있었다. 실제 압입의 정도는 시계방향일 경우 0.3mm를 반시계 방향일 경우 0.4mm로 압입하였다.

조직의 형상을 통하여 나사방향에 따른 툴의 회전방향이

용접에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있었다. 사각뿔형 툴의 경우 핀의 형상이 좌, 우가 동일함에 따라 용접부 조직이 방향성을 타지 않았다.

Fig. 6과 같이 사각뿔형 툴에서 600mm/min로 이송 시에는 400mm/min에서와 달리 교반부(SZ)의 물결무늬 거동이 (a)보다 넓게 자리하는데 이와 같은 무늬는 (b)에서 볼 수 있듯이 교반 부위(SZ)가 넓어 졌음을 말하는 것이다.

물결무늬를 띤 곳의 조직은 조밀한 반면 기계적 열영향부(TMAZ)의 조직이 다른 것을 알 수 있다. 즉 이송속도가 600mm/min에서 교반이 더 많이 이뤄짐에 따라 교반부(SZ)가 넓어졌음을 알 수 있다.

툴의 핀 형상이 회전방향에 따라 용접부의 조직형상과의 관계를 Table 3을 통하여 나타내었다.

3.2 접합부의 기계적강도

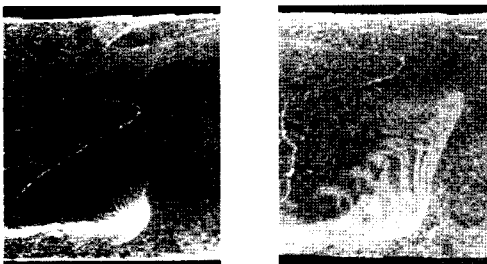
3.2.1 Pin의 형상에 따른 이송속도의 기계적 경도

핀형상에 따른 접합부의 경도를 값을 측정된 결과 Fig. 7~8과 같은 결과를 나타내었다.

비커스 경도를 통하여 나타난 값의 결과는 사각뿔형 툴에서 2380rpm으로 회전시 이송속도가 600mm/min에 비하여 상대적으로 낮은 400mm/min에서 기계적열 영향부의 가장 낮은 경도값은 70Hv의 값으로 툴 솔더의 외경 부위에 위치하며 경도값이 낮은 두 값의 거리는 12~13mm의 거리를 갖는 반면 600mm/min으로 접합시에는 낮은 경도값을 기준으로 하였을때 10~11mm 정도의 거리차이를 갖고 가장 낮은 양단의 경도값은 77Hv의 값을 보였다. 또한 접합중심부에서 모재 값의 평균경도값인 125Hv로 복귀하는 거리가 600mm/min 이송시에 더 짧았다.

나사형 툴에서 2380rpm으로 회전 시 400mm/min 에 비해 600mm/min에서 용접중심부의 경도값이 모재의 경도값으로 복귀하는 거리가 상대적으로 짧아 사각뿔형 툴과 비슷한 그래프 양상을 보였다.

기계적 열영향부에서 경도가 낮아지는 현상은 마찬가지로 있으나 사각뿔형 툴은 경도가 낮아지는 양단의 거리가



(a) 400mm/min (b) 600mm/min

Fig. 6 Quadrangular pyramid tool

Table 3 Rotation and structure of tools

Tool	Threaded cylindrical		Quadrangular pyramid	
	Clock wise	Counter clockwise	Clock wise	Counter clockwise
Macro structure	Funnel	Onion ring	Funnel	Funnel

400mm/min에서나 600mm/min에서 8~9mm정도로 거의 같은 값으로 나타났다.

Fig. 7에서 400mm/min의 이송속도를 가지고 나선형 툴을 시계방향으로 회전시켜 접합한 경우 기계적열영향부에서 경도값이 많이 낮아지는 반면 반시계방향으로 회전시에는 600mm/min으로 이송하는 값과 큰 차이를 보이지 않았으며 용접중심부에서 모재의 경도값으로 복귀도 짧은 구간에서 이루어 졌다.

이송속도에 따른 경도값의 차이는 마찰교반용접시 나타

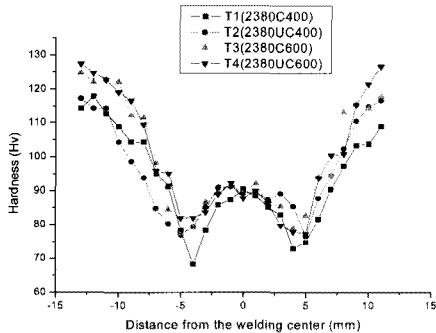
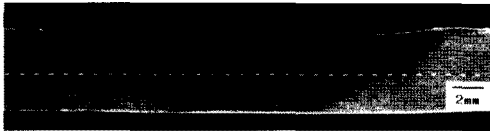


Fig. 7 Hardness of threaded cylindrical tool

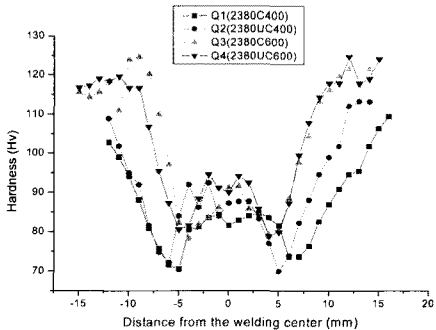


Fig. 8 Hardness of quadrangular pyramid tool

나는 열에 의한 요인으로 회전수가 같은 조건에서 이송속도의 차이로 인해 모재가 열을 받는 시간이 다른데서 오는 결과로 판단된다. 이송속도가 빠를수록 마찰열이 정체되는 현상을 줄여 줌으로써 열처리 가공된 Al6061-T6의 모재가 연화됨을 줄일 수 있으며, 이는 경도값의 향상을 가져오며 나선형툴의 경우에는 나선산의 반대 방향으로 용접을 하는 것이 경도값이 낮아지는 결과를 줄이는 역할을 한다.

3.2.2 편형상과 틀회전 방향에 따른 기계적 강도

편형상을 달리하여 툴의 회전방향을 시계방향과 반시계방향으로 용접하여 나타나는 인장강도를 측정된 결과를 Table 4-5와 같은 값을 얻을 수 있었다.

전체적으로 2380rpm에서의 용접은 400mm/min에서 600mm/min으로 이송속도가 증가할수록 인장강도가 증가하였다. 400mm/min의 이송속도에서 나선형툴의 최대인장강도

Table 4 Result of threaded cylindrical tool

Tool	Threaded cylindrical tool			
	Spindle speed (rpm)	2380	2380	2380
Weld speed (mm/min)	400	400	600	600
Rotation	Clock wise	Counter clockwise	Clock wise	Counter clockwise
Tensile strength (Mpa)	243	249	267	266

Table 5 Result of quadrangular pyramid tool

Tool	Quadrangular pyramid tool			
	Spindle speed (rpm)	2380	2380	2380
Weld speed (mm/min)	400	400	600	600
Rotation	Clock wise	Counter clockwise	Clock wise	Counter clockwise
Tensile strength (Mpa)	255.8	255.8	266.5	269.9

는 방향성에 따라 값의 차이가 있지만 최저 243MPa, 최대 249MPa의 값을 갖는 반면, 사각뿔형틀의 경우 틀의 회전방향에 관계없이 256MPa의 값을 갖고, 600mm/min의 이송속도로 용접을 하였을 때 나사형틀은 266MPa의 값을 사각뿔형틀은 269MPa로 모재대비 75%의 인장강도를 갖는다. 마찰교반용접시 마찰열이 충분히 발생할 경우 이송속도가 600mm/min으로 빠르게 용접하는 것이 모재의 연화를 일정 정도 방지하여 기계적인 인장강도를 증가시킴을 알 수 있다. 또한 회전방향에 따른 인장강도의 차이는 나타나지만 그 값이 크게 나타나지 않았으며, 기존부터 널리 사용되는 나사형틀에 비하여 사각뿔형틀의 용접성능도 양호한 성능을 나타내었다.

4. 결론

마찰교반 용접법으로 열처리된 3.1mmt Al 6061-T6 판재의 공구의 핀 형상, 이송속도, 회전방향에 따른 맞대기 용접에 대한 연구결과를 다음과 같이 얻을 수 있었다.

- (1) 나사형 핀의 모양을 갖은 공구는 회전방향에 따른 용접부의 미세조직의 거동 모양이 시계방향에서는 깔때기(Funnel)모양으로, 반시계방향에서는 동심원(Orion ring) 형태의 교반모양을 보였고, 사각뿔 형태의 핀에서는 깔때기 모양으로 좌우대칭인 조직거동을 보였다.
- (2) 회전수가 2300rpm에서 용접시 경도값은 용접 속도 400mm/min 보다 600mm/min으로 용접할 때 용접부 중심부에서 모재의 평균 경도값에 해당하는 125Hv로 회복하는 거리가 짧았다.
- (3) 600mm/min로 속도로 용접시 인장강도의 값이 400mm/min으로 용접시 보다 증가 하였다.
- (4) 최대 인장강도는 400mm/min의 속도로 용접시에는 나사형 틀은 회전방향에 따른 약간의 차이가 있고, 600mm/min으로 용접시에는 나사형 핀과 사각뿔형 핀의 기계적 강도 차이는 크지 않았다.

참고 문헌

- (1) Dawes, C. J., 1995, "An introduction to friction stir welding and its development," *Welding and Metal Fabrication*, Vol. 63, No. 1, pp. 13~14.
- (2) Dawes, C. J. and Thomas, W. M., 1996, "Friction stir process welds aluminum alloys," *Welding Journal USA*, Vol. 75, No. 3, pp. 41~45.
- (3) Jata, K. V., Mahoney, M. H., Mishra, R. S., Semiatin, S. L., and Lienert, T., 2003, "Friction stir welding and processing," *TMS Annual Meeting*, San Diego, CA, USA, 2-6, pp. 274.
- (4) Cah, Y. H. and Kim, D. J., 1996, "A Fracture mechanics study on the fatigue crack growth behaviors in aluminum alloy weldments," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 5, No. 3, pp. 31.
- (5) Seidel, T. U. and Reynolds, A. P., 2001, "Visualization of the material flow in AA2195 friction-stir welds using a marker insert technique," *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 32, No. 11, pp. 2879~2884.
- (6) Sua, J. Q., Nelson, T. W., Mishrab, R., and Mahoney, M., 2003, "Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium," *Acta Materialia*, Vol. 51, Issue 3, pp. 713~729.
- (7) Hisanori, O., Kinya, A., Msahiko, S., Masakuni, E., and Kenji, I., 2001, "Behavior of oxide during Friction Stir welding of aluminum Alloy and Its Influence on mechanical properties," *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, Vol. 19, No. 3, pp. 446.
- (8) Yeon, Y. M., Lee, W. B., and Jung, S. B., 2001, "Microstructures and characteristics of friction-stir-welding joints in aluminum alloys," *Journal of KWS*, Vol. 19, No. 6, pp. 20~21.
- (9) Rajesh, S. R., Bang, H. S., Chang, W. S., Kim, H. J., Bang, H. S., Oh, C. I., and Chu, J. S., 2007, "Numerical determination of residual stress in friction stir weld using 3D-analytical model of stir zone," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187~188, pp. 224~226.